

УДК 556

DOI: 10.34753/HS.2020.2.4.391

**ОБ ИЗМЕНЕНИИ
КОЭФФИЦИЕНТА РЕДУКЦИИ
МАКСИМАЛЬНОГО МОДУЛЯ
СТОКА С УВЕЛИЧЕНИЕМ
ПЛОЩАДИ ВОДОСБОРА**

С.М. Тумановская

ООО НПО «Гидротехпроект», г. Валдай, Россия

sw258@rambler.ru

**ON CHANGE OF REDUCTION
FACTOR OF MAXIMUM RUNOFF
MODULUS WITH INCREASE OF
CATCHMENT AREA**

Svetlana M. Tumanovskaya

Scientific and Industrial Research Association

Gidrotehproekt, Valday, Russia

sw258@rambler.ru

Аннотация. При формировании речного стока, как правило, происходит уменьшение (редукция) его максимального модуля при возрастании площади водосбора. Для водосборов площадью менее 5 км² редукция максимальных модулей водоотдачи и стока не выражена, что подтверждает принятое допущение о равенстве водоотдачи и стока для малых площадей водосбора. Это первый этап процесса формирования стока воды половодья на безрусловых склонах. На втором этапе на водосборах площадью от 5 до 10 км² появляется тенденция к снижению максимального модуля стока с увеличением площади водосбора. Причина снижения модулей водоотдачи – уменьшение действующей площади водосбора как следствие изменения площади покрытия снегом; для модулей стока воды – снижение действующей площади водосбора и начало руслового регулирования. На третьем этапе на водосборах с площадью от 10 до 100 км² снижение максимального модуля стока воды в зависимости от площади водосбора имеет устойчивую тенденцию, определяющуюся русловым регулированием, снижением действующей площади водосбора, особенностями нарастания площади водосбора по длине основного водотока. На четвертом этапе на водосборах с площадью более 100 км² редукция максимального модуля стока воды имеет устойчивый вид и определяется русловым регулированием и особенностями нарастания площади водосбора по длине основного водотока. Для малых водотоков зависимость

Abstract. When forming river runoff, as a rule, its maximum modulus decreases (reduction) as the catchment area increases. For catchments with an area of less than 5 km², reduction of maximum drainage and runoff modules is not expressed, which confirms the accepted assumption of equal drainage and runoff for small catchment areas. This is the first stage of the process of forming flood water runoff on channel-free slopes. At the second stage, catchments with an area of 5 to 10 km² tend to decrease the maximum runoff modulus with an increase in catchment area. The reason for the decrease in drainage modules is a decrease in the effective catchment area as a result of a change in the snow cover area; for water flow modules - reduction of the effective catchment area and beginning of channel regulation. At the third stage, at catchments with an area of 10 to 100 km², a decrease in the maximum water flow modulus depending on the catchment area has a stable tendency, determined by channel regulation, a decrease in the existing catchment area, and features of the increase in the catchment area along the length of the main watercourse. At the fourth stage, at catchments with an area of more than 100 km², the reduction of the maximum module of water flow has a stable appearance and is determined by channel regulation and features of the increase in the catchment area along the length of the main watercourse. For small watercourses, the dependence of the shape coefficient of the catchment (K_f) on its area reflects the process of development of the catchment from slopes in which the width of the catchment is significantly longer, to watercourses where the width of the catchment becomes less than

коэффициента формы водосбора (K_f) от его площади отражает процесс развития водосбора от склонов, в которых ширина водосбора существенно больше длины, к водотокам, где ширина водосбора становится меньше длины водотока. В целом K_f недостаточно информативен и не отражает особенностей нарастания площади водосбора по длине русла главного водотока. Основной причиной использования при анализе и расчетах K_f является отсутствие кадастровых данных о нарастании площади водосбора по длине русла главного водотока для всех гидрологически изученных рек.

Ключевые слова: максимальный модуль стока; коэффициент формы водосбора; коэффициент редукиции; площадь водосбора; половодье; слой стока; расход воды

Введение

При формировании речного стока, как правило, происходит уменьшение (редукиция) его максимального модуля при возрастании площади водосбора. Эта зависимость неоднозначна и может меняться на различных по величине водотоках. В связи с этим представляется важным оценить редукицию максимального модуля стока воды весеннего половодья в пространстве и времени на разных этапах процесса его формирования.

В качестве объектов исследования приняты малые водотоки Московской области.

О коэффициенте редукиции максимального модуля стока

Общепринятое выражение «коэффициент редукиции стока» связано с максимальным модулем стока весеннего половодья или дождевых паводков заданной вероятности превышения $P\%$. Как правило, в гидрологических исследованиях в качестве опорной принята вероятность превышения $P\%=1\%$. Так, в широко применяемой с 1937 года редукиционной формуле Д.Л. Соколовского (1), степенной параметр n

the length of the watercourse. In general, K_f is not sufficiently informative and does not reflect the features of the increase in catchment area along the length of the channel of the main watercourse. The main reason for using K_f in analysis and calculations is the lack of cadastral data on the increase in catchment area along the length of the main watercourse bed for all hydrologically studied rivers.

Keywords: maximum unit discharge; shape factor of the watersheds; reduction coefficient; area of watershed; flood; drain layer; flow of water

представляет собой коэффициент редукиции максимального модуля стока весеннего (или летнего) половодья с увеличением площади водосбора F , км²:

$$q_{max,1\%} = \frac{A_{max,1\%}}{(F+1)^n} * \delta \quad (1)$$

где $A_{max,1\%}$ – максимальный модуль стока весеннего (или летнего) половодья с элементарного водосбора, м³/с·км², как правило, $A_{max,1\%}$ рассматривают также как максимальную интенсивность водоотдачи с безрусловых склонов в русловую сеть;

F – площадь водосбора, км².

Элементарный водосбор – безрусловой склоновый водосбор. Площади безрусловых склонов в большой степени зависят от климатических характеристик, почв, слагающих водосбор, наличия травяного покрова, уклона водосбора, экспозиции склона.

В таблице 1 приведены наибольшие предельные значения площадей безрусловых склонов для Северо-Запада Российской Федерации (по данным работы [Нежиховский, 1971]).

Таблица 1. Наибольшие предельные значения площадей безрусловых склонов (зона отсутствия русловой эрозии) для Северо-Западного региона Российской Федерации

Table 1. The highest limit values of the areas of riverless slopes (the zone of absence of riverbed erosion) for the North-Western region of the Russian Federation

Интенсивность поверхностного стекания (водоотдачи), мм/час Surface run-off rate (water discharge), mm/hour	Уклон водосбора, ‰ Catchment slope, ‰	Травяной покров Grass cover	Наибольшая предельная площадь безруслового склона, км ² Maximum limit area of absolute slope, km ²
20	≤10	Удовлетворительный Satisfactory	1,5-2,0
10	≤10	Удовлетворительный Satisfactory	5,5
20	≤10	Редкий Rare	0,2
10	≤10	Редкий Rare	0,7
20	30	Удовлетворительный Satisfactory	0,15
10	30	Удовлетворительный Satisfactory	0,5

Все малые водосборы с размерами, превышающими предельные площади, приведенные в таблице 1, имеют динамически устойчивое русло водного объекта, а водосборы, площади которых менее приведенных предельных значений, характеризуются неустойчивым местным русловым процессом. Исходя из таблицы 1 можно принять допущение, что в целом для Северо-Западного региона Российской Федерации наибольшая площадь безрусловых склонов не превышает 5 км².

На малых водотоках весеннее половодье представляет собой несколько суточных волн, формирование которых обусловлено внутрисуточным ходом температуры воздуха и связанной с ним интенсивностью снеготаяния, продолжительность активной фазы которой в течение суток не превышает 8-10 часов.

Следует отметить, что суточные гидрографы стока воды малых водотоков в период весеннего половодья косвенно учитывают аккумуляющую роль бессточных понижений на водосборе и потери стока на инфильтрацию в

почву. При этом в связи с незначительной продолжительностью склонового и практически отсутствием руслового добегаания не проявляется влияние распыливания наибольшей суточной волны половодья.

Учитывая вышеприведенное, суточные гидрографы стока воды малых водотоков и стоковых площадок можно рассматривать как суточные гидрографы водоотдачи талых вод со склонов в русловую сеть.

В работе [Тумановская, 1981] приведены ординаты осредненных кривых редукции относительной максимальной интенсивности водоотдачи $\psi(\tau_6) = f(\tau)$ для заданных интервалов времени, которые в дальнейшем были приравнены к бассейновому времени добегаания. Значения этих ординат получены, исходя из вышеуказанного условия о соответствии гидрографов стока и водоотдачи, на основе обработки и статистического анализа многолетних данных максимальных суточных гидрографов и суточных слоев стока воды ($h \cdot P\%$, мм) малых водотоков воднобалансовых

станций Европейской части Российской Федерации (стоковых площадках, ручьях и логах) площадью менее 10 км².

На основе ряда преобразований были рассчитаны значения относительных максимальных модулей водоотдачи (стока) $A_{max,P\%}^* = \frac{q_{max,P\%}}{h_{P\%}^*}$ для $P \leq 25\%$ в зависимости от гидроморфометрического параметра русла Φ_p и времени склонового добегания, которые представлены в таблице 2.

С учетом выражений (2) и (3) [Тумановская, 1995] было получено уравнение (4) для определения площади водосбора F , км², соответствующей гидроморфометрическому параметру русла Φ_p (по таблице 2) при известном

значении суточного слоя стока ($h_{P\%}^*$ мм) вероятности превышения $P\%$.

$$F = 0,31 \cdot L^2 \quad (2)$$

$$I_{ср.р.} = \frac{11,3}{F^{0,35}} \quad (3)$$

где L – длина водотока, км;

$I_{ср.р.}$ – средневзвешенный уклон русла реки, ‰.

$$F = \left(\frac{\Phi_p}{89,3}\right)^{2,70} \cdot h_{P\%}^* \quad (4)$$

Формула (2) принята согласно исследованиям Г.А. Алексеева для рек Европейской части Российской Федерации с $F \leq 100-1000$ км², а формула (3) – по рекомендациям Р.А. Нежиховского для водотоков, водосборы которых можно соотнести с возвышенностями, холмами и увалами.

Таблица 2. Значения относительного максимального модуля стока

Table 2. Values of the relative maximum flow modulus

Время склонового добегания $\tau_{ск}$, МИН Slope running time, min	Гидроморфометрический параметр русла Φ_p , мин Hydromorphology parameter channel Φ_p , min								
	0	10	30	60	90	150	200	300	400
	60	0,048	0,038	0,036	0,033	0,029	0,025	0,022	0,017
120	0,045	0,035	0,033	0,029	0,025	0,022	0,019	0,016	0,014

Таблица 3. Определение 1% модуля стока весеннего половодья; время склонового добегания 60 мин

Table 3. Determination of 1% of the spring flood runoff; $\tau_{ск}=60$ min

Φ_p	$h_{1\%}^*$	20 мм		50 мм		100 мм	
	$A_{max,1\%}^*$	F , км ²	$q_{max,1\%}$, м ³ /с·км ²	F , км ²	$q_{max,1\%}$, м ³ /с·км ²	F , км ²	$q_{max,1\%}$, м ³ /с·км ²
0	0,048	0	0,96	0	2,4	0	4,8
1	0,046	0,000	0,92	0,000	2,3	0,000	4,6
5	0,042	0,003	0,84	0,006	2,1	0,007	4,2
10	0,038	0,021	0,76	0,039	1,9	0,046	3,8
20	0,037	0,1	0,74	0,3	1,85	0,3	3,7
30	0,036	0,4	0,72	0,8	1,8	0,9	3,6
40	0,035	0,9	0,7	1,6	1,75	1,9	3,5
50	0,034	1,6	0,68	3,0	1,7	3,5	3,4
60	0,033	2,6	0,66	4,9	1,65	5,8	3,3
70	0,031	4,0	0,62	7,4	1,55	8,7	3,1
80	0,03	5,7	0,6	10,6	1,5	12,5	3
90	0,029	7,8	0,58	14,6	1,45	17,2	2,9
100	0,028	10,4	0,56	19,4	1,4	22,9	2,8
150	0,025	31,1	0,5	58,0	1,25	68,4	2,5
200	0,022	67,7	0,44	126	1,1	149	2,2
250	0,019	124	0,38	230	0,95	272	1,9
300	0,017	202	0,34	377	0,85	445	1,7
400	0,015	440	0,3	820	0,75	967	1,5

Для низменностей зависимость вида формулы (3) должна быть представлена в виде

$$I_{ср.р.} = \frac{1,4}{F^{0,35}} \quad (5)$$

Расчетная формула для определения значений гидроморфометрического параметра русла Φ_p в формуле (4) имеет следующий вид:

$$\Phi_p = \frac{1000L}{m_p^*(I_p)^{0,33} F^{0,25} (h_{1\%}^*)^{0,25}} \quad (6)$$

где m_p^* , (м/мин) – гидравлический параметр, характеризующий шероховатость русла водотока.

В таблице 3 представлены расчеты площадей условных водосборов, F , согласно (4) при значениях максимального суточного слоя стока $h_{1\%}^*$, равных 20, 50 и 100 мм, и значениях гидроморфометрического параметра русла Φ_p из таблицы 2.

Значения $q_{max,1\%}$, $м^3/с \cdot км^2$, для этих вариантов расчета определены исходя из формулы (7) при $\tau_{ск}=60$ мин

$$A_{max,1\%}^* = \frac{q_{max,1\%}}{h_{1\%}^*} \quad (7)$$

На рисунке 1 приведены зависимости $q_{max,1\%}=f(F)$, которые для очень малых водосборов отражают характер изменения водоотдачи для трех вариантов значений максимального суточного слоя стока вероятности превышения $P=1\%$. Также на рисунке 1 нанесены расчетные значения максимальных модулей стока весеннего половодья расчетной вероятности превышения $P=1\%$ ($q_{max,1\%}$), полученные на основе статистического анализа многолетних данных наблюдений за максимальным стоком воды весеннего половодья для малых водотоков Московской области. Базовая гидрологическая информация по этим водотокам представлена в таблицах 4 и 5 [Виноградов и др., 2015].

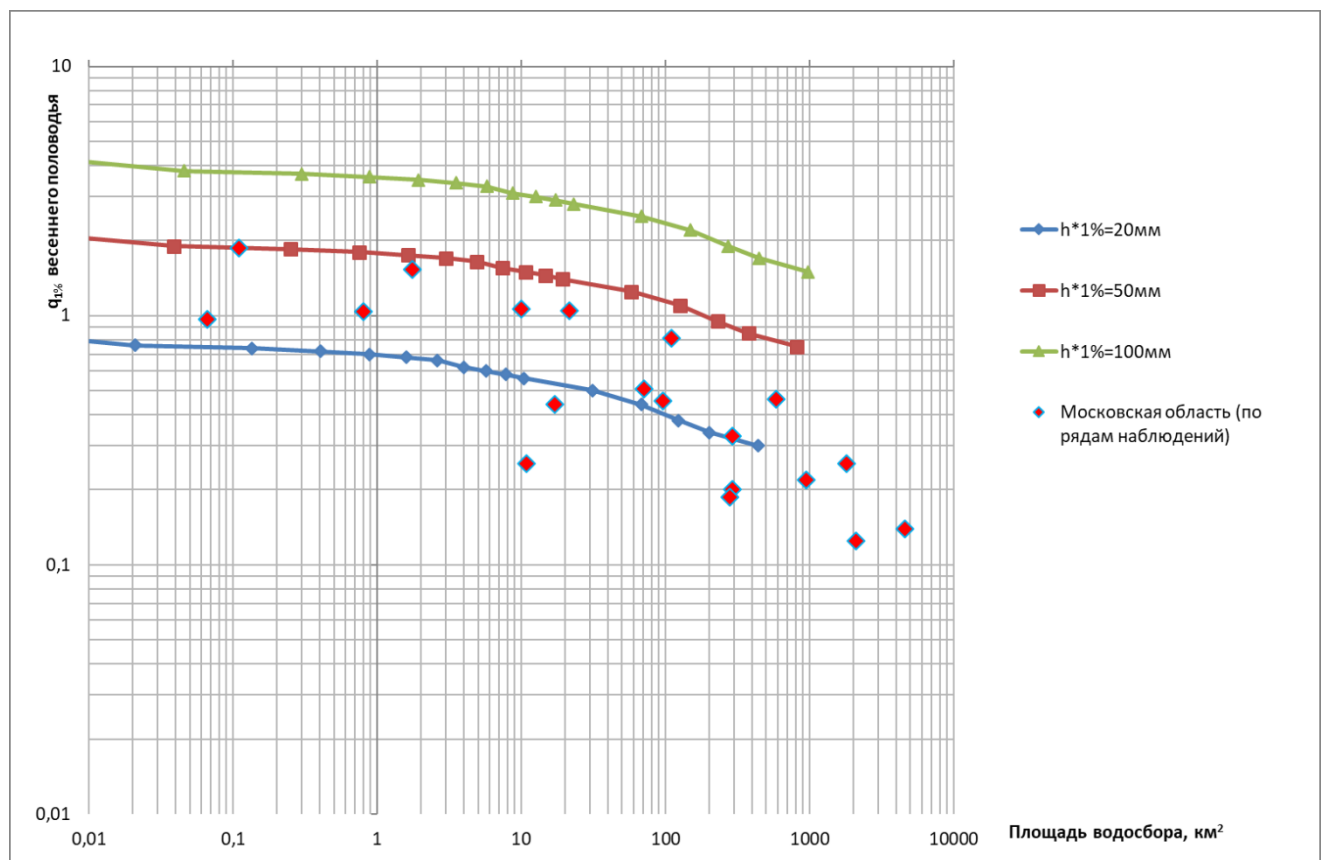


Рисунок 1. Зависимость 1% модуля стока весеннего половодья от площади водосборов для водотоков Московской области

Figure 1. Dependence of 1% of the spring flood runoff module on the catchment area for watercourses of the Moscow Region

Таблица 4. Базовая гидрологическая информация по малым водотокам Московской области
Table 4. Basic hydrological information on small watercourses of the Moscow Region

Река (гидрологический пост) River (hydrological post)	Код поста Post code	Площадь, км ² Area, km ²	Длина, км Length, km	Уклон реки, ‰ River slope, ‰	q _{1%} , м ³ /с·км ²	h _{1%} , мм	K _{0,1%}
руч. Малица (с. Николо-Малица)	75052	10,9	3,4	5	0,26	115	0,002
р. Дубна (пгт Вербилки)	75079	2100	113	0,42	0,12	226	0,001
р. Нерль (д. Подол)	75093	1810	100	0,4	0,25	257	0,001
р. Орлица (д. Большой Рог)	75335	96	22	1,6	0,46	246	0,002
р. Катмыш (с. Троицкое)	75428	70,5	14,8	5	0,51	252	0,002
р. Нудоль (д. Кузнецово)	75429	291	38	1,2	0,20	262	0,001
р. Мал. Истра (д. Киселево)	75430	280	41	0,9	0,19	192	0,001
р. Медвенка (д. Лапино)	75434	10	4	7,1	1,06	259	0,004
р. Медвенка (д. Большое Сареево)	75435	21,5	7,3	5,9	1,04	202	0,005
лог Лызлово (д. Лызлово)	75437	1,76	1,3	18,3	1,53	137	0,011
р. Зака (д. Большое Сареево)	75438	17	6	6	0,44	183	0,002
руч. Прогоны (д. Большое Сареево)	75441	0,8	1,6	19,6	1,04	135	0,008
лог Полевой (д. Лызлово)	75442	0,11	0,2	18,7	1,86	221	0,008
лог Лесной (д. Лызлово)	75443	0,066	0,1	21,8	0,97	127	0,008
р. Большой Ломовис (с. Рождественское)	75527	110	19	1,6	0,81	232	0,003
р. Клязьма (г. Павловский Посад)	75550	4550	184	0,4	0,14	187	0,001
р. Воря (с. Мишнево)	75559	947	88	0,6	0,22	205	0,001
р. Серая (д. Новинки)	75561	293	40	1	0,33	212	0,002
р. Лух (пгт Лух)	75591	587	45	0,6	0,46	304	0,002

Таблица 5. Гидрологические характеристики малых водотоков Московской области

Table 5. Hydrological characteristics on small watercourses of the Moscow Region

Код поста Post code	$Q_{\max,1\%}$, м ³ /с	$Q_{\max,1\%}$ ср.сут., м ³ /с	$h^*_{1\%}$, набл., мм	Φ_p , мин	$A^*_{1\%}$	τ_p , мин	K_Φ
75052	2,78	2,2	17	60	0,033	172	0,89
75079	262	260	11	1366	-	4155	1,56
75093	461	420	20	1089	-	3245	1,50
75335	43,7	33	30	286	0,017	814	1,71
75428	35,9	17	21	156	0,025	395	1,37
75429	58,3	52	15	486	0,014	1439	1,58
75430	52,2	46	14	594	-	1755	1,75
75434	10,6	5,6	48	50	0,034	129	1,10
75435	22,4	10	40	83	0,03	208	1,31
75437	0,87	0,83	41	19	0,037	43	0,95
75438	7,51	3,8	19	87	0,029	223	1,23
75441	0,83	0,23	25	32	0,036	70	1,81
75442	0,205	0,068	20	7	0,04	13	0,69
75443	0,064	0,025	33	3	0,044	8	0,46
75527	89	44	35	230	0,02	589	1,37
75550	636	636	12	1807	-	5508	1,65
75559	207	200	18	1009	-	3051	1,90
75561	96,5	78	23	491	0,014	1418	1,66
75591	270	250	37	488	0,014	1460	1,27

Следует заметить, что на рисунке 1 основная масса точек, соответствующих водотокам, приведенным в таблице 4, расположена между двумя линиями зависимости $q_{\max,1\%}=f(F)$, для значений $h^*_{1\%}$ равных 20 мм и 50 мм, являющихся преимущественно пограничными значениями суточных слоев стока $h^*_{1\%}$ для рассматриваемых водотоков.

На основе анализа рисунка 1 можно сделать вывод, что для водосборов площадью менее 5 км² (первая группа водотоков) снижение (редукция) максимальных модулей водоотдачи (по кривым зависимости) и стока (по статистически обработанным данным наблюдений) не является ярко выраженным. Отсутствуют и существенные различия в значениях этих модулей, что подтверждает принятое допущение о равенстве водоотдачи и стока для малых площадей водосбора.

Этот этап развития в пространстве и времени процесса формирования стока воды весеннего половодья на безрусловых склонах при отсутствии влияния руслового регулирования является *первым*. В этот период последовательно развиваются процессы снеготаяния, внутриснежной аккумуляции, инфильтрации воды в почву, водоотдачи и стекания поверхностного и ручейкового. При этом большое влияние помимо климатических факторов оказывают форма водосбора, экспозиция и уклон склонов, почвы, слагающие водосбор, а также хозяйственная освоенность. При стекании по склонам талой воды слоем или по микроручейковой сети характер движения воды является неустойчивым с переходом от ламинарного к турбулентному.

На втором этапе на водосборах площадью от 5 до 10 км² (вторая группа водотоков), соответствующих согласно таблице 3 значениям

Φ_p в диапазоне от 50 до 80 мин., появляется, хотя и не ярко выраженная, тенденция к снижению максимального модуля стока с увеличением площади водосбора (рисунок 1).

Для условных водосборов, соответствующих величинам гидроморфометрического параметра русла Φ_p в диапазоне 50–80 минут, также имеет место незначительная редукция максимальных модулей водоотдачи. При этом характер этих изменений для максимальных модулей водоотдачи и стока воды в принципе является идентичным. Однако причины редукции водоотдачи и стока воды на этих водосборах не являются общими. Основная причина снижения модулей водоотдачи связана с уменьшением действующей площади водосбора вследствие изменения площади покрытия снегом, а для модулей стока воды – со снижением действующей площади водосбора и началом руслового регулирования.

На третьем этапе на водосборах с площадью от 10 до 100 км² (третья группа водотоков) снижение максимального модуля стока воды зависимости $q_{\max,1\%}=f(F)$ имеет уже достаточно устойчивую тенденцию (рисунок 1), которая определяется в основном тремя факторами:

- 1) русловым регулированием;
- 2) снижением действующей площади водосбора;
- 3) особенностями нарастания площади водосбора по длине основного водотока.

Следует отметить, что 2-ой и 3-ий факторы в численном выражении отражаются коэффициентом формы водосбора, который рассчитывается по формуле

$$K_\phi = \frac{L}{F^{0,56}} \quad (8)$$

где L – длина водотока, км;

F – площадь водосбора реки, км².

На четвертом этапе на водосборах с площадью более 100 км² (четвертая группа водотоков) редукция максимального модуля стока воды зависимости $q_{\max,1\%}=f(F)$ имеет ярко выраженный устойчивый вид и определяется в основном русловым регулированием и особенностями нарастания площади водосбора по длине основного водотока.

Для вышеприведенных трех групп малых водотоков с площадью менее 100 км² характерной особенностью водного режима в период весеннего половодья является внутрисуточный ход стока воды, обусловленный внутрисуточным ходом температуры воздуха и временем бассейнового добегания менее 1 суток.

Для определения значения площади водосбора водотоков Московской области, где соотношение срочного и среднесуточного максимальных расходов воды приближается к единице, были выполнены расчеты. Для всех водотоков, приведенных в таблицах 4 и 5, были определены по формуле (9) значения руслового времени добегания τ_p , мин.

$$\tau_p = \frac{1000L}{m_p^*(I_p)^{0,33}(Q_{\max,1\%})^{0,25}} \quad (9)$$

На основе полученных значений были выделены водотоки с $\tau_p \leq 400$ мин (соответствующие водосборам площадью 70 км²), которые были сгруппированы в таблицу 6. На рисунке 2 представлена зависимость $q_{\text{вод},1\%}/q_{\max,1\%}=f(\tau_p)$ для этих водотоков.

Анализ рисунка 3 показывает, что наибольшая предельная площадь водосборов малых водотоков Московской области, на которых внутрисуточный ход стока затухает, не превышает 70-100 км², что соответствует примерно 500 минутам бассейнового времени добегания (при $\tau_{\text{ск}}=100$ мин).

Таблица 6. Определение отношения максимальных модулей водоотдачи ($q_{\text{вод},1\%}$) и стока ($q_{\text{max},1\%}$) для малых водотоков Московской области

Table 6. Determination of the ratio of the maximum water output modules ($q_{\text{water},1\%}$) and drain ($q_{\text{max},1\%}$) for small watercourses of the Moscow region

Река (гидрологический пост) River (hydrological post)	Код поста Post code	Площадь, км ² Area, km ²	L, км	K_{ϕ}	τ_p , мин	$\frac{q_{\text{вод},1\%}}{q_{\text{max},1\%}}$
руч. Малица (с. Николо-Малица)	75052	10,9	3,4	0,89	172	2,26
р. Катыш (с. Троицкое)	75428	70,5	14,8	1,37	395	1,08
р. Медвенка (д. Лапино)	75434	10	4	1,10	129	1,55
р. Медвенка (д. Большое Сареево)	75435	21,5	7,3	1,31	208	1,16
р. Закса (д. Большое Сареево)	75438	17	6	1,23	223	1,27
лог Лесной (д. Лызлово)	75443	0,066	0,1	0,46	8	1,49
лог Лызлово (д. Лызлово)	75437	1,76	1,3	0,95	43	0,98
руч. Прогоны (д. Большое Сареево)	75441	0,8	1,6	1,81	70	0,86

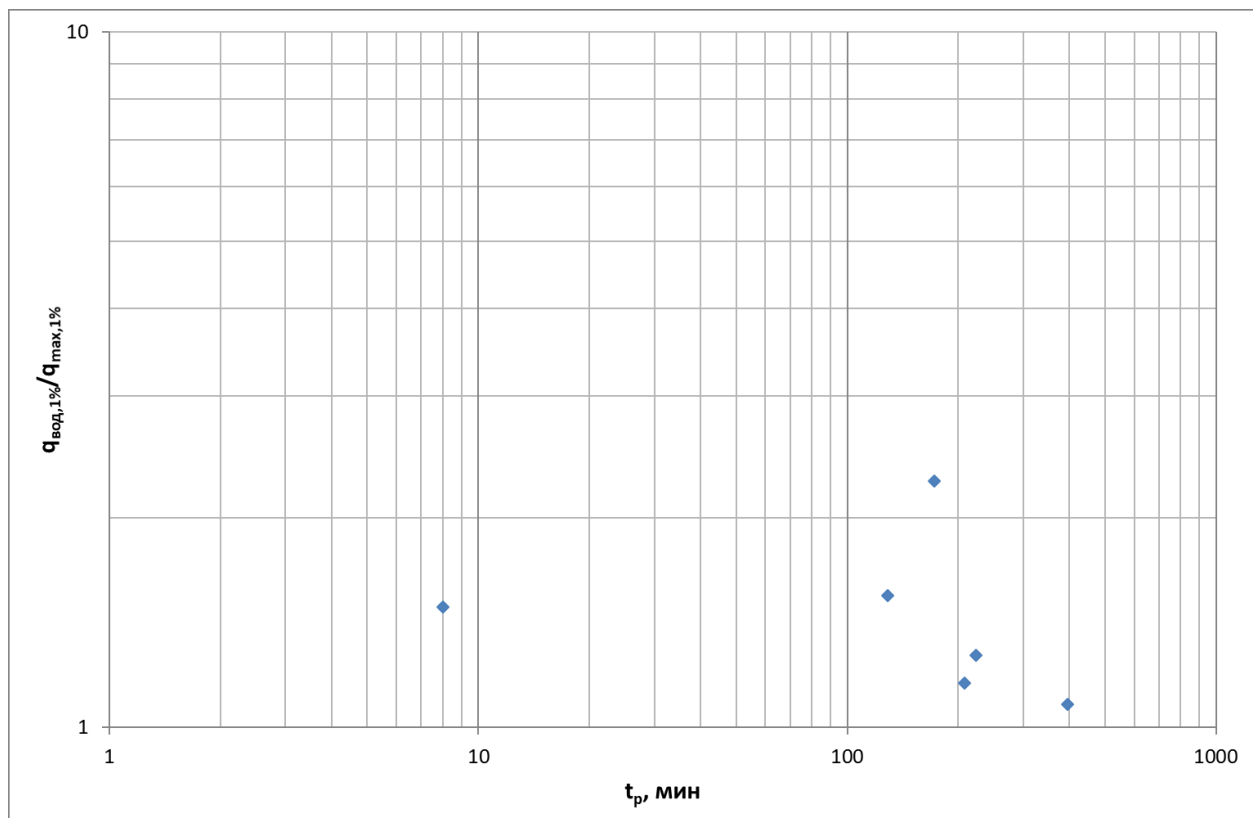


Рисунок 2. Зависимость $q_{\text{вод},1\%}/q_{\text{max},1\%}=f(\tau_p)$ для малых водотоков Московской области
Figure 2. Dependence of $q_{\text{вод},1\%}/q_{\text{max},1\%}=f(\tau_p)$ for small watercourses of the Moscow region

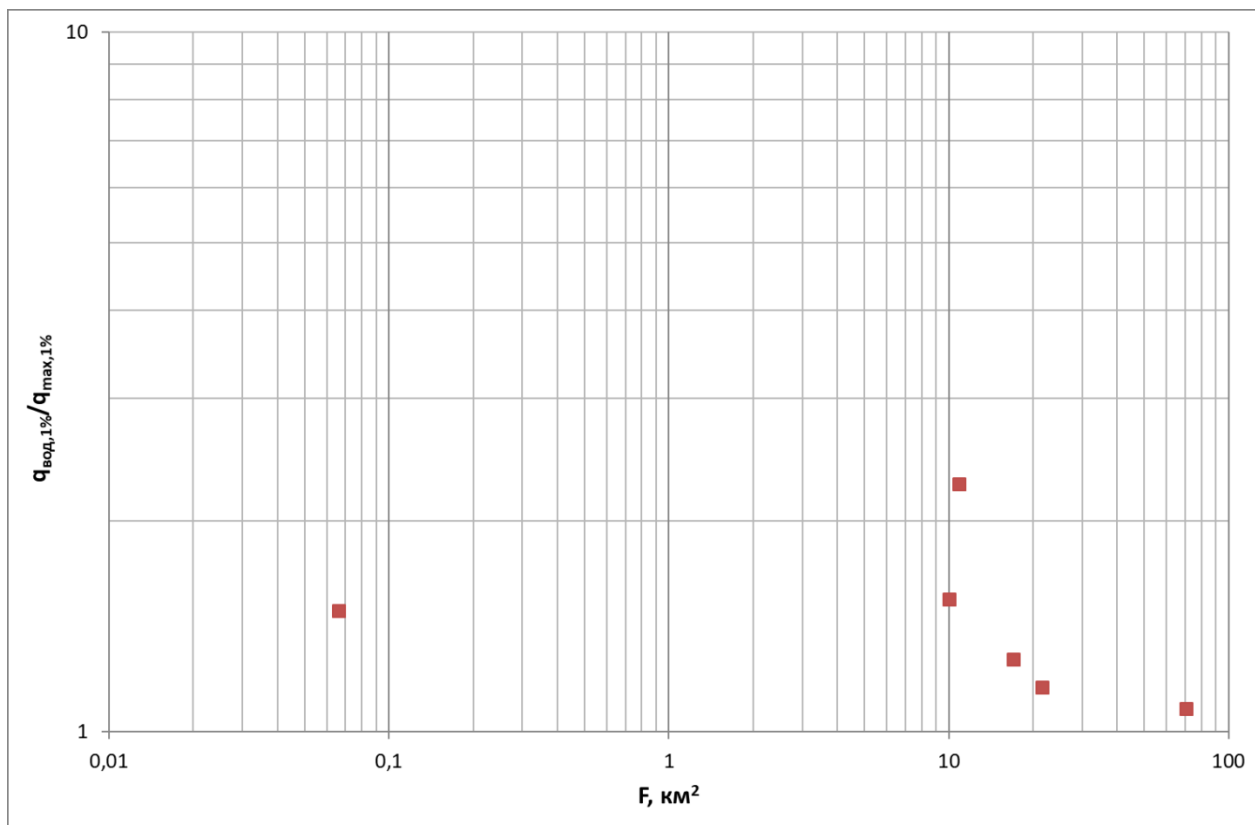


Рисунок 3. Зависимость $q_{вод,1\%}/q_{max,1\%}=f(F)$ для малых водотоков Московской области

Figure 3. Dependence of $q_{вод,1\%}/q_{max,1\%}=f(F)$ for small watercourses of the Moscow region

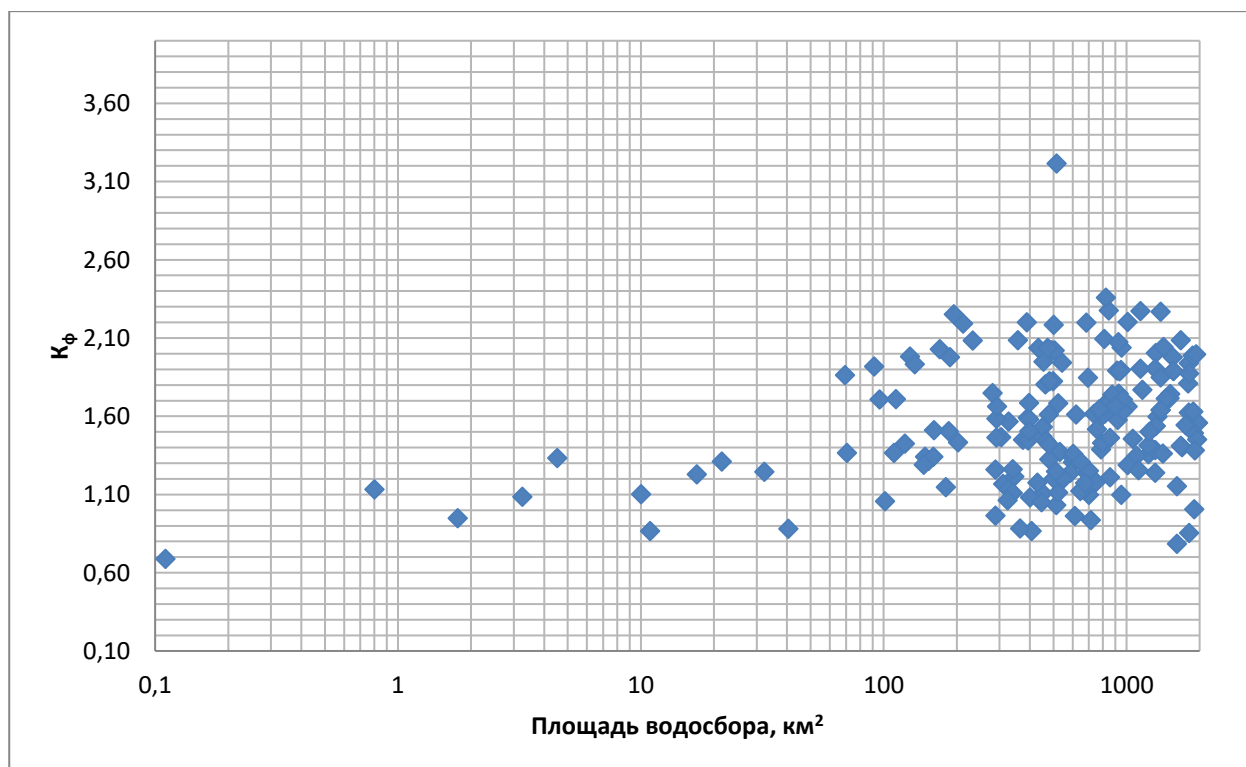


Рисунок 4. График связи коэффициента формы водосбора K_f с площадью водосбора F , км²

Figure 4. Connection graph between the coefficient of the catchment area K_f and the catchment area F , км²

Для четвертой группы водотоков отсутствие внутрисуточного хода стока приводит к устойчивой тенденции изменения максимального модуля стока ($q_{\max,1\%}$, $\text{м}^3/\text{с}\cdot\text{км}^2$) с увеличением площади водосбора (F , км^2), что способствует достаточно надежному определению коэффициента редукиции максимального модуля стока вероятности превышения $P=1\%$, отражающему общий характер зависимости $q_{\max,1\%}=f(F)$. В то же время следует отметить, что для этой группы рек характерной чертой является широкий диапазон изменений в значениях $q_{\max,1\%}$ для одной и той же площади водосбора F .

Одним из основных факторов, приводящих к столь существенным разбросам, является форма водосбора водотоков. Как указано выше, в настоящее время основным численным показателем этого фактора является коэффициент формы водосбора K_{ϕ} , который определяется по формуле (8). На рисунке 4 представлен график связи $K_{\phi}=f(F)$ для водотоков бассейна Верхней Волги, включающего водотоки Московской области.

Из рисунка 4 можно сделать следующие выводы:

1) Для водотоков площадью менее 100 км^2 зависимость $K_{\phi}=f(F)$ отражает процесс развития водосбора от склонов, в которых ширина водосбора существенно больше длины, к водотокам, где ширина водосбора становится существенно меньше длины водотока. То есть, иными словами, склоны площадью менее 1 км^2 представляет собой вытянутую форму, в большой степени ориентированную как бы перпендикулярно основному направлению поверхностного стекания.

2) Форма водосборов площадью около 100 км^2 представляет собой уже устойчивую грушевидную форму ($K_{\phi}=1,2-1,3$), где ширина водосбора становится существенно меньше длины водотока.

3) Чем больше коэффициент формы ($K_{\phi}\geq 1,3$), тем более вытянутым является водосбор вдоль основного русла водотока. При этом для подобных водосборов характерной чертой является отсутствие значительных притоков.

4) Для водосборов с коэффициентом $K_{\phi}\leq 1,3$ характерной формой водосбора является грушевидная и даже более округлая в связи с наличием большого числа достаточно существенных водотоков.

Следует отметить, что, к сожалению, коэффициент формы водосбора недостаточно информативен и не отражает особенностей нарастания площади водосбора по длине русла главного водотока. Основной причиной использования при анализе и расчетах лишь коэффициента K_{ϕ} является отсутствие кадастровых данных о нарастании площади водосбора по длине русла главного водотока для всех гидрологически изученных рек.

Наличие таких данных позволило бы построить кривые связи $F_n/F=f(L_n*100/L)$ на подобии кривых вероятности распределения, где F_n/F и L_n*100/L представляли бы относительные значения площадей водосборов для отдельных участков n (в относительных единицах) и соответствующих им длин главного русла (в процентах).

На основе анализа этих зависимостей появится возможность выработки принципов группировки рек по характеристикам кривых связи $F_n/F=f(L_n*100/L)$ и, как следствие, уточнение коэффициентов редукиции максимальных модулей стока.

О показателе n , характеризующим тенденцию изменения коэффициента дружности половодья (K_0) с увеличением площади водосбора (F , км^2)

В нормативных документах определение расчетных максимальных расходов воды весеннего половодья вероятности превышения $P\%$ производится по формулам, использующим коэффициент дружности половодья K_0 , который рассчитывается из формулы (10) при наличии рек-аналогов обратным ходом вычислений.

$$Q_{P\%} = \frac{K_0 h_{P\%} \mu \delta \delta_1 \delta_2 F}{(F + F_1)^n} \quad (10)$$

Как правило, в формуле (10) параметр n трактуется, как показатель степени редукиции, то есть показатель степени снижения параметра K_0 с увеличением площади водосбора F . Значение n

определяется на основе построения зависимости $K_0^* = f(F)$, где K_0^* рассчитывается по формуле

$$K_0^* = \frac{q_{max,1\%}}{h_{1\%}} \quad (11)$$

В формулах (10) и (11) $h_{p\%}$ и $h_{1\%}$ (мм) – слой стока весеннего половодья (для равнинных и полугорных рек) или слой годового стока (для высокогорных районов Средней Азии и Кавказа) вероятностью превышения $P\%$ и 1% соответственно.

На рисунке 5 представлен график связи $K_0^* = f(F)$ для водотоков Московской области, а на рисунке 6 – график связи $h_{1\%} = f(F)$.

По данным водотоков Московской области с увеличением площади водосбора согласно рисунку 1 максимальный модуль стока весеннего половодья ($q_{max,1\%}$) уменьшается, а согласно

рисунку 6 слой стока весеннего половодья ($h_{1\%}$, мм) увеличивается.

В гидрологической литературе также отмечается, что в горных районах слой стока весеннего половодья ($h_{1\%}$, мм) возрастает с увеличением средней высоты водосбора (H , м). Таким образом, с учетом приведенных сведений, обобщенно можно записать

$$h_{1\%} = h_F \cdot F^{n_1} \quad (12)$$

$$h_{1\%} = h_H \cdot H^{n_2} \quad (13)$$

Формула (12) отражает увеличение слоя стока весеннего половодья с увеличением площади водосбора, а формула (13) – увеличение слоя стока весеннего половодья с увеличением средней высоты водосбора.

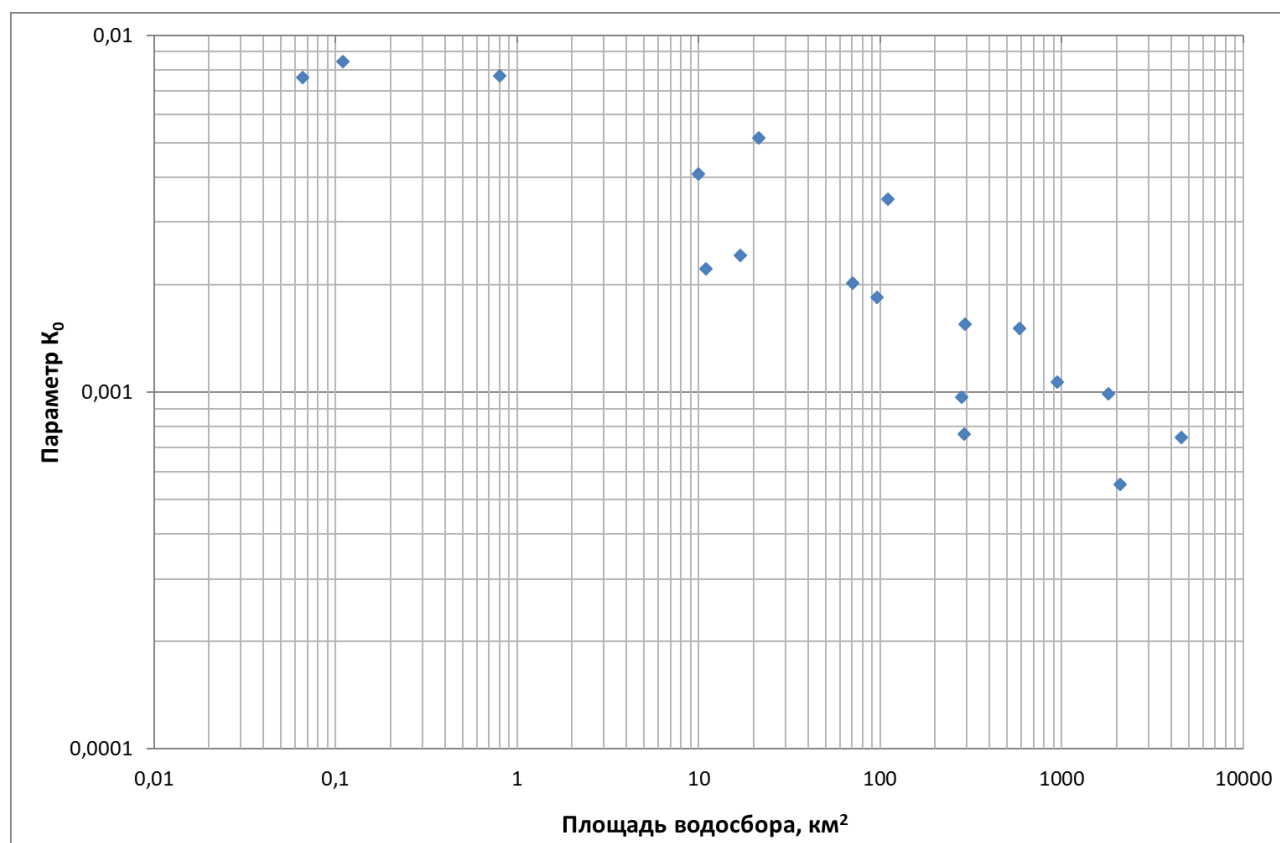


Рисунок 5. График связи $K_0^* = f(F)$ для водотоков Московской области
Figure 5. Connection graph $K_0^* = f(F)$ for watercourses of the Moscow region

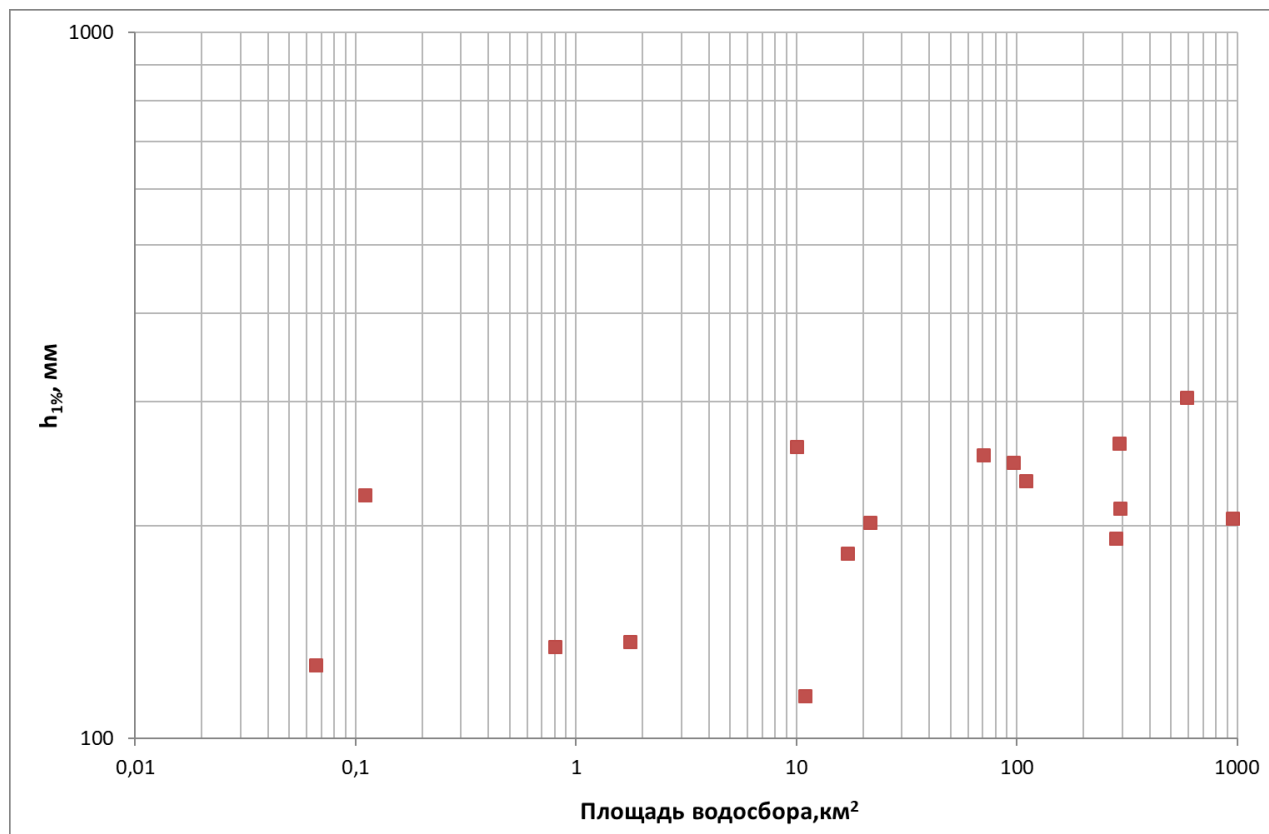


Рисунок 6. График связи $h_{1\% \text{весеннего половодья}}=f(F)$ для водотоков Московской области

Figure 6. Connection graph $h_{1\% \text{spring flood}}=f(F)$ for watercourses of the Moscow region

Выводы

Коэффициент редукиции является результирующим показателем, совокупно отражающим характер ряда зависимостей максимального модуля и слоя стока весеннего половодья вероятности превышения $P=1\%$ с увеличением площади и средней высоты водосбора.

В гидрологически однородных горных районах средняя высота водосбора может уменьшаться с увеличением площади водосбора. В этих случаях возможно увеличение слоя стока

весеннего половодья с уменьшением площади водосбора.

Учитывая выше отмеченные зависимости составляющих K_0^* (максимального модуля и слоя стока весеннего половодья), при гидрологических исследованиях необходимо выявить превалирующие факторы влияния отдельно для максимального уровня и максимального модуля стока. Затем необходимо выявить следующие факторы влияния и только при отсутствии таковых строить зависимость типа $K_0^* = f(F)$, исключив из расчетной формулы коэффициент редукиции максимального модуля стока весеннего половодья.

Литература

Виноградов А.Ю., Никифоровский А.А., Догановский Д.А., Белоногова Н.А., Виноградова Т.А., Марков М.Л., Салминен Э.О., Тюрин Н.А. Новые методы расчетов максимального стока для малых водотоков лесной зоны. СПб.: СПбГЛТУ, 2015. 481 с.

References

Nezhikhovskii R.A. *Ruslovaya set' basseina i protsess formirovaniya stoka vody [The channel network of the basin and the process of water flow formation]*. Leningrad, Publ. Gidrometeoizdat, 1971. 476 p. (In Russian).

Tumanovskaya S.M. *Raschet maksimal'nogo stoka vesennego polovod'ya s malykh vodosborov i*

Нежиховский Р.А. Руслевая сеть бассейна и процесс формирования стока воды. Л.: Гидрометеиздат, 1971. 476 с.

Тумановская С.М. Расчет максимального стока весеннего половодья с малых водосборов и склонов на основе кривой редукции водоотдачи // Исследования формирования речного стока и его расчеты: межведомственный сборник ЛГМИ, выпуск 76 / Отв. ред. Б.Б. Богословский. Л.: Ленингр. политехн. ин-т, 1981. С. 97-106.

Тумановская С.М. Особенности организации полевых исследований на малых водосборах для оценки характеристик максимального стока // Условия формирования и методы прогноза стока Волги: Сб. работ по проекту РФФИ (93-05-9111) / Под ред. В.И. Бабкина. СПб.: Гидрометеиздат, 1995. С.70-81.

sklonov na osnove krivoi reduksii vodootdachi [Calculation of the maximum runoff of spring floods from small catchments and slopes on the basis of the water loss reduction curve] In B.B. Bogoslovskii (ed.) *Issledovaniya formirovaniya rechnogo stoka i ego raschety* [Studies of river runoff formation and its calculations], Leningrad, Publ. of Leningrad Polytechnic Institute, 1981, pp. 97-106. (In Russian).

Tumanovskaya S.M. Osobennosti organizatsii polevykh issledovaniy na malykh vodosborakh dlya otsenki kharakteristik maksimal'nogo stoka [Features of the organization of field research on small catchments to assess the characteristics of maximum runoff]. In V.I. Babkin (ed.) *Usloviya formirovaniya i metody prognoza stoka Volgi: sbornik rabot po projektu RFFI (93-05-9111)* [Conditions for the formation and methods of forecasting the runoff of the Volga: Collection of papers on the RFBR project (93-05-9111)]. Saint Petersburg, Publ. of Gidrometeoizdat, 1995, pp.70-81. (In Russian).

Vinogradov A.Yu., Nikiforovskii A.A., Doganovskii D.A., Belonogova N.A., Vinogradova T.A., Markov M.L., Salminen E.O., Tyurin N.A. *Novye metody raschetov maksimal'nogo stoka dlya malykh vodotokov lesnoi zony* [New methods for calculating the maximum flow for small watercourses in the forest zone]. Saint Petersburg, Publ. of SPbGLTU, 2015. 481 p. (In Russian).